植物营养与肥料学报 2012,18(6):1428-1433
Plant Nutrition and Fertilizer Science

微晶化对钾长石粉钾素释放的影响

吕乐福[1],盖国胜[2],李絮花[1],杨玉芬[2],李美清[1],何振全[3],刘春生[1*]
(1 山东农业大学资源与环境学院,山东泰安 271018;2 清华大学材料系,教育部先进材料实验室,北京 100084;
3 浙江清华长三角研究院粉体及新材料工程中心,浙江长兴 313100)

摘要: 利用微晶化设备对钾长石进行机械力活化处理,研究了不同处理时间对钾长石粉颗粒组成、钾素释放量及生物有效性的影响。结果表明,钾长石经微晶化设备分别加工 10 min、40 min、120 min 和 180 min 后,微细颗粒(d ≤10 μm)组成比例分别达到 51.69%、65.44%、85.34% 和 93.93%,比表面积明显增大,衍射峰强度显著减弱,同时钾素的释放量显著提高,其中微晶化处理 180 min 样品 T_3 效果最好,2 mol/L HNO_3 和蒸馏水 3 次提取的钾总量分别为 6118.8 mg/kg 和 2867.8 mg/kg;4 个处理(10 min、40 min、120 min 和 180 min)酸提钾总量分别是蒸馏水提钾总量的 2.46、1.81、2.19 和 2.13 倍,两种浸提剂提钾总量占钾长石全钾的 0.50%~5.73%。微晶化以后钾长石粉中的绝大部分钾素仍以矿物态存在,但其生物有效性显著提高,促进了籽粒苋的生长和钾素积累。

关键词: 微晶化;机械力活化;钾长石粉;钾释放
中图分类号: S143.3+1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)06-1428-06

Effects of microcrystalline grinding on potassium release in K-feldspar rock

LÜ Le-fu[1], GAI Guo-sheng[2], LI Xu-hua[1], YANG Yu-fen[2], LI Mei-qing[1], HE Zhen-quan[3], LIU Chun-sheng[1*]
(1 College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai' an 271018, China;
2 Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University/Key Laboratory of Advanced Materials Sponsored by the Education Ministry of China, Beijing 100084, China; 3 Powder and New Materials Engineering Center, Yangzi Delta Research Instiute of Tsinghua University in Zhejiang, Changxing 313100, China)

Abstract: The K-feldspar rocks, mechanically activated by a microcrystalline mill with different times, were used to study effects of microcrystalline grinding on size distribution, potassium releases and bioavailability. The results showed that the cumulative percentage of fine particles (d≤10 μm) in K-feldspar rocks which treated with 10 min, 40 min, 120 min and 180 min respectively reached 51.69%, 65.44%, 85.34% and 93.93%. With increasing ground time, the specific surface area obviously increased, the diffraction peak decreased remarkably and the potassium release amount improved significantly. Among them, the T_3 treatment activated as 180 min had the best effect of potassium release amount with 6118.8 mg/kg and 2867.8 mg/kg by 2 mol/L HNO_3 and distilled water respectively. The total potassium of samples treated as 10 min, 40 min, 120 min and 180 min with acid treatments was 2.46, 1.81, 2.19 and 2.13 times higher than that of the distilled water treatments. The total potassium extracted by two solutions was 0.50%-5.73% in K-feldspar and the form was still mainly mineral potassium, but the microcrystalline K-feldspar rock with higher bioavailability could promote growth of gain amaranth and K accumulation.

Key words: microcrystalline grinding; mechanically activation; K-feldspar rock; potassium release

钾是植物生长发育的必需营养元素之一,而钾肥是农业生产中的重要物质保障。由于我国制造钾肥的钾盐资源匮乏,因而利用难溶性钾矿制造钾肥成为目前研究的热点之一[1-2]。钾长石是一种含钾

收稿日期: 2012-03-24　　**接受日期:** 2012-06-17
基金项目: 农业科技成果转化资金(2010GB23600657);无锡市 130 科技计划支撑;山东省自然科学基金支撑(ZR2009DM043)项目资助。
作者简介: 吕乐福(1986—),男,陕西乾县人,博士研究生,主要从事新型肥料研究与利用方面的工作。E-mail: lvlefu@163.com
* 通讯作者 E-mail: csliu@sdau.edu.cn

的硅酸盐难溶矿物,理论含 K_2O 16.9%。我国钾长石资源丰富,分布广泛,K_2O 储量近4亿吨[3]。国内对钾长石制造钾肥的研究按照工艺可分为直接法、湿法化学法、煅烧法、挥发法和微生物分解法[4-6]。这些方法在实际生产中存在能耗高、周期长、工艺路线复杂等特点,因而不能应用于生产。

有研究表明,通过机械简单加工处理后的难溶性含钾矿粉直接施用可以被作物吸收并起到增产的效果[7-10],但关于难溶性含钾矿物不同程度细化后的理化特征及其应用效果的研究鲜见报道。本研究从粉体材料加工的角度出发,对钾长石进行微晶化研磨活化,破坏钾长石晶格结构,降低粒径,增大比表面积,研究其物理性质的变化以及钾释放动态,并用砂培籽粒苋试验验证其肥效,以期为钾长石制造钾肥的生产实践提供新的思路。

1　材料与方法

1.1　样品制备与分析

钾长石粉的原矿产地为安徽岳西县,粒径1～2 cm,经清华大学材料系粉体工程研究室 WJH－1 型微晶化设备分别加工 10 min、40 min、120 min 和 180 min,制得 T_0、T_1、T_2 和 T_3 4 个样品。样品全部过 0.15 mm 筛,去除杂质,取筛下物,其主要化学成分含量为 SiO_2 65.79%、Al_2O_3 17.65%、Fe_2O_3 1.17%、K_2O 10.68%、Na_2O 2.50%、$P_2O_5$0.46%。

粒度分布用丹东百特 BT－9300H 激光粒度分析仪测定;比表面积用 SBT－127 型数显勃氏透气比表面积仪测定;日本 JEOL 公司生产的 JSM－6301F 型扫描电子显微镜用于钾长石粉颗粒表面形貌表征的测定;晶格结构变化用日本理学 RINT2000 X－ray 测定分析。

1.2　浸提试验

2 mol/L 的冷 HNO_3 浸提:称取供试样品 1.000 g 放入 200 mL 的离心管中,准确加入 100 mL 浓度为 2 mol/L 的冷 HNO_3,在 25℃ 恒温条件下 150 r/min 振荡 120 min,取出离心管,以 3500 r/min 离心 10 min,将上清液转入 250 mL 三角瓶中,然后再在离心管中加入 100 mL 2 mol/L 的冷 HNO_3,重复上述操作,连续 3 次;浸提完毕后,取三角瓶中的澄清液,用上海精密科学仪器有限公司生产的 6400A 火焰光度计测定。

蒸馏水浸提:浸提液改为 100 mL 蒸馏水,其余按照上述步骤操作。

1.3　砂培试验与测定

供试籽粒苋品种为美国红苋 R104,由山东农业大学种子公司提供。试验在山东农业大学玻璃温室内进行。试验用不透光高强度聚乙烯盆钵(上 Φ7.5 cm,下 Φ5.5 cm,高 10.5 cm),每盆装化学纯石英砂 350 g。石英砂中按 5% 的比例加入不同处理的钾长石矿粉(T_0、T_1、T_2 和 T_3)。选饱满的籽粒苋种子,经 55℃ 温烫浸种消毒 15 min 后每盆播种 20 颗,期间用蒸馏水保持石英砂湿润,并用 0.01 mol/L HCl 和 NaOH 调节 pH 至 6.5,于黑暗中发芽 3 d 后,每盆定苗 3 株。定苗后,全营养对照处理(Full K)用 Hoagland-Anon 全量营养液浇灌培养,不施钾对照处理(CK)和施用矿物钾(Tr0、Tr1、Tr2 和 Tr3)处理均用缺钾的 Hoagland-Anon 营养液浇灌培养,每隔 3 d 更换一次营养液,每次 50 mL。共 6 个处理,每个处理重复 3 次,共计 18 盆。

籽粒苋生长 60 d 后收获,植株于 100℃ 杀青 20 min,再在 65℃ 条件下烘干,测定干物重。样品粉碎后,用 $H_2SO_4－H_2O_2$ 消解—火焰光度法测定植株含钾量。

试验数据均采用 Excel 2007、SPSS18.0 和 OriginPro8.0 进行分析。

2　结果与分析

2.1　微晶化钾长石粉的物理特征

2.1.1 粒度分析　用激光粒度分布仪对 4 个样品进行粒度分布测定,得到钾长石粉累积分布曲线,如图 1所示。从图 1 可以看出,微晶化处理时间直接影响了钾长石粉颗粒的粒度组成。4 个样品粒度范围从大到小的顺序为 $T_0 > T_1 > T_2 > T_3$,97% 的颗粒通过的粒径分别为 42.51 μm、31.95 μm、18.15 μm、12.06 μm,其中微细颗粒($d \leq 10$ μm)的比例分别为 51.69%、65.44%、85.34%、93.93%,说明微晶化处理时间延长,降低了钾长石粉整体颗粒粒径,促使颗粒粒度范围收缩变窄,同时也提高了微细颗粒的组成比例。

2.1.2 表面形貌和比表面积　表面形貌对颗粒群的物理和化学性质产生诸多影响,如颗粒的比表面积、分散性、化学活性等[11]。利用电子显微镜对 4 个样品进行表面形貌观察(图 2),发现处理 10 min 样品 T_0 颗粒较大,表面平滑,结构致密,呈板块状,有明显的断口且颗粒大小分布不均匀;处理 40 min 样品 T_1 与 T_0 相比,大颗粒减少,结构致密;处理 120 min 样品 T_2 微细颗粒明显增多,附着在大颗粒表

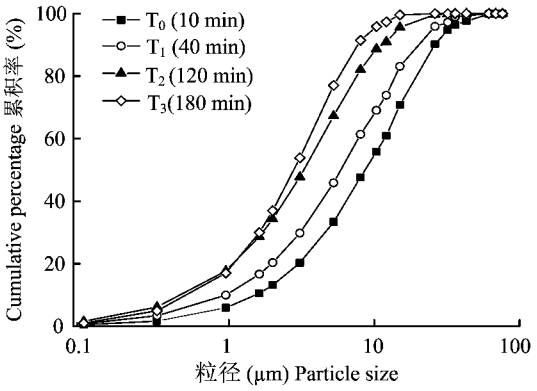

图1 微晶化钾长石粉粒度分布

Fig. 1 Size distribution of microcrystalline K-feldspar rock

面；处理180 min样品T_3颗粒整体较小，表面粗糙，分布均匀，结构较为疏松，呈碎屑状，没有明显的断口。颗粒粒径越小，表面越粗糙，内部结构的空隙、裂纹、微孔越多，比表面积也就越大。用透气法测定4个样品的比表面积，得到样品T_0、T_1、T_2、T_3的比表面积分别为665.95、1029.28、1590.93、1636.95 m^2/kg，处理180 min样品T_3比表面积最大，分别是样品T_0、T_1、T_2的2.46、1.59和1.03倍。可见，本试验条件下，微晶化处理时间增加，提高了颗粒的均一性，造成钾长石结构疏松和表面粗糙，并促进了比表面积的扩张与增大。

2.1.3 晶体结构　从图3可以看出，试验所用钾长石中主要存在3种物相，分别为微斜长石、钠长石和石英。在强机械力的作用下，随着微晶化处理时间的延长，钾长石尖锐的主峰衍射强度明显减弱，特征峰跨度增大，部分特征峰消失，说明钾长石在研磨过程中晶体结构破坏严重，晶体结构不断无序化，并发生了晶格畸变。但从整个衍射图谱上看，钾长石中的主要特征峰仍清晰可见，表明钾长石物相并没有发生改变，仍以钾微斜长石为主。

2.2 微晶化钾长石粉钾素释放特征

用2 mol/L的冷HNO_3和蒸馏水对不同处理的钾长石粉进行三次连续浸提，来表征钾长石物理性质变化对钾素溶出的影响。从表1可以看出，在酸溶液和蒸馏水中，除硝酸浸提第三次外，不同处理单次提钾量均随微晶化处理时间的增加而增加，具体

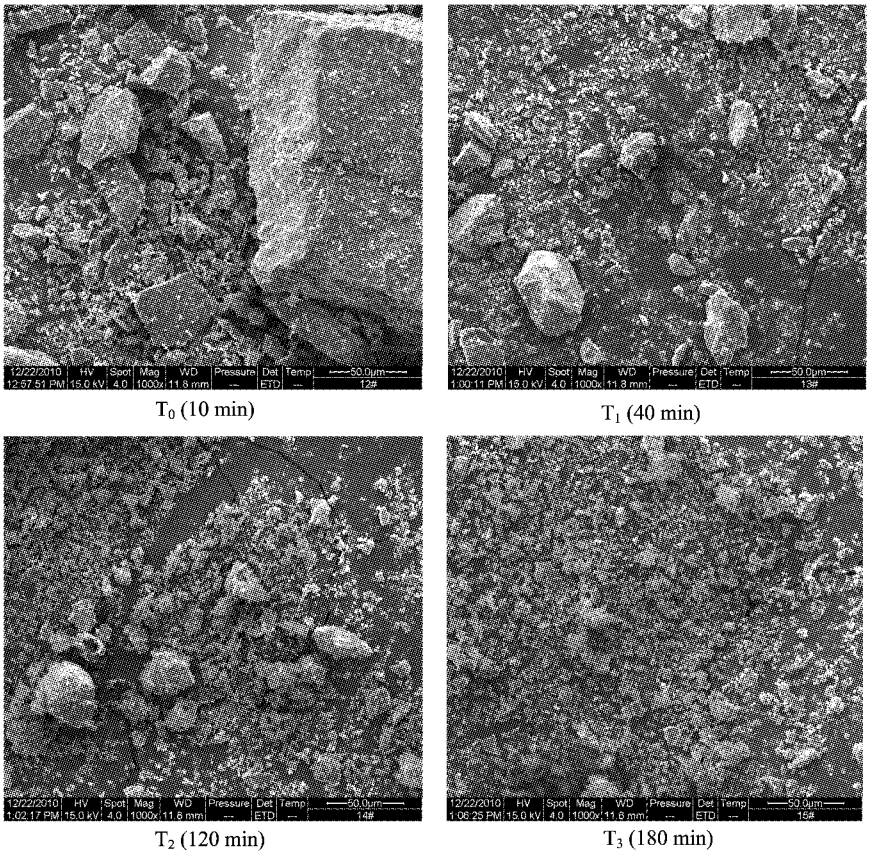

图2 微晶化钾长石粉电镜照片

Fig. 2 SEM photograph of microcrystalline K-feldspar rock

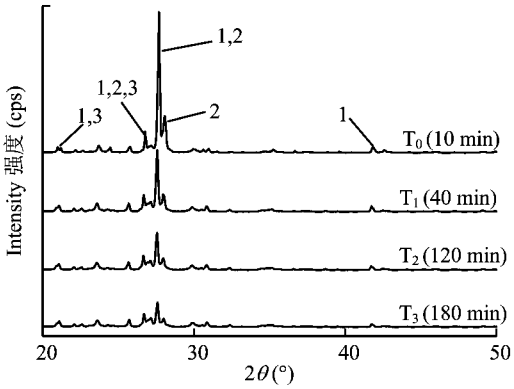

图 3　微晶化钾长石粉 XRD 图谱

Fig. 3　X-ray diffraction pattern of microcrystalline K-feldspar rock

[注(Note):1—微斜长石 Microcline;2—钠长石 Albite;3—石英 Quartz.]

表现为 $T_3 > T_2 > T_1 > T_0$,差异显著。同一处理,随着浸提次数的增加,单次提钾量呈下降的趋势,且最大提钾量都集中于第一次,说明钾长石粉中钾素的释放存在阶段性,不同阶段钾素释放量不同。从提钾总量上看,酸浸提和水浸提都表现为 $T_3 > T_2 > T_1 > T_0$,差异显著,说明微晶化处理时间增加促进了钾长石粉中钾素的释放,效果显著。两种浸提剂相比,钾素在蒸馏水中释放较为缓和,持续能力更强,除样品 T_0 外,其他 3 个样品钾素释放量在第 2 次和第 3 次均大于相应的酸处理;但从总量上看,4 个处理酸提钾总量明显大于水提钾总量,T_0、T_1、T_2 和 T_3 处理酸提钾总量分别是蒸馏水提钾总量的 2.46、1.81、2.19 和 2.13 倍,这是因为酸溶液中含有大量 H^+,K^+ 交换速度要快于水溶液。可见,本试验条件下,微晶化处理时间越长,越有利于钾长石粉中钾素的溶出和释放,在酸性环境中释放量更大。

表 1　不同浸提剂对钾长石粉钾释放的影响

Table 1　Effects of different extractants on potassium release in K-feldspar rock

处理 Treat.	时间 Time (min)	浸提剂 Extractant	单次量 Single doses (K_2O mg/kg) 1st	2nd	3rd	总量 Total content (K_2O mg/kg)	浸出率 Extr. rate (%)
T_0	10	2 mol/L HNO_3	953.4 ± 35.3 d	221.3 ± 8.15 d	141.1 ± 5.59 c	1315.8 ± 22.6 d	1.23
T_1	40	2 mol/L HNO_3	2551.3 ± 46.0 c	377.5 ± 6.02 c	253.4 ± 6.42 b	3182.2 ± 36.3 c	2.98
T_2	120	2 mol/L HNO_3	3880.4 ± 25.0 b	482.7 ± 5.39 b	313.3 ± 8.17 a	4676.4 ± 20.3 b	4.38
T_3	180	2 mol/L HNO_3	5275.4 ± 40.1 a	532.9 ± 6.31 a	310.5 ± 7.24 a	6118.8 ± 35.2 a	5.73
T_0	10	蒸馏水 Distilled water	244.1 ± 3.82 d	163.1 ± 5.62 d	127.0 ± 2.34 d	534.2 ± 7.10 d	0.50
T_1	40	蒸馏水 Distilled water	971.0 ± 6.38 c	485.3 ± 4.86 c	304.9 ± 10.0 c	1761.2 ± 8.39 c	1.65
T_2	120	蒸馏水 Distilled water	1110.3 ± 10.6 b	598.7 ± 8.83 b	428.0 ± 8.93 b	2137.0 ± 8.17 b	2.00
T_3	180	蒸馏水 Distilled water	1495.4 ± 26.0 a	806.1 ± 30.0 a	566.3 ± 29.4 a	2867.8 ± 61.2 a	2.69

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed different letters in a column are significantly different among different treatments at the 5% level.

微晶化处理时间增加还提高了钾长石粉中钾素的浸出率,其中处理 180 min 样品 T_3 的浸出率最高,酸浸提和蒸馏水浸出率分别为 5.73% 和 2.69%,分别是效果最差样品 T_0 的 4.65 倍和 5.37 倍(表 1)。从总的浸提效果看,酸溶液和蒸馏水的浸出率在 0.50 %～5.73% 的范围内,仅占钾长石全钾的一小部分,说明钾长石中的大部分钾素仍以矿物态和缓效态存在并未浸出。

2.3　微晶化钾长石粉对籽粒苋生物量、植株含钾量和吸钾量的影响

2.3.1 对生物量和植株含钾量的影响　从表 2 可知,与不施钾空白处理(CK)相比,施钾处理的籽粒苋生物量显著增加。其中,全营养液处理(Full K)的生物量最大,明显优于钾长石粉处理。4 个钾长石粉处理的生物量随着微晶化处理时间的增加而增大,除 T1 和 T2 处理差异不显著外,其他处理之间差异均达到显著水平,其中处理 180 min 的样品 T_3 效果最好,分别比 CK、Tr0、Tr1 和 Tr2 处理增加了 80.36%、27.84%、16.28% 和 7.91%。

从表 2 还可以看出,施钾还促进了籽粒苋植株的钾素积累,植株体内钾素含量从小到大的顺序为

表2 不同施肥处理下籽粒苋的生物量、植株含钾量和吸钾量

Table 2 The biomass, K content and K uptake of gain amaranth in different fertilizer treatments

处理 Treatment	生物量 Biomass (g/pot, DW)	含钾量 K content (g/kg, DW)	吸钾量 K uptake (mg/pot)	吸钾量占全营养液钾的比例 K uptake/full K in nutrient sollution (%)
CK	1.66 ±0.09 e	0 e	0 f	
Tr0	2.35 ±0.09 d	14.61 ±0.75 d	34.24 ±0.44 e	23.45
Tr1	2.58 ±0.08 c	22.60 ±1.49 c	58.24 ±1.93 d	39.88
Tr2	2.78 ±0.16 c	33.29 ±2.21 b	92.38 ±0.95 c	63.26
Tr3	3.00 ±0.06 b	36.42 ±3.12 b	109.16 ±7.30 b	74.76
Full K	3.39 ±0.06 a	43.07 ±0.78 a	146.02 ±5.10 a	100.00

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达到5%显著水平 Values followed different letters in a column are significantly different among different treatments at the 5% level.

CK < Tr0 < Tr1 < Tr2 < Tr3 < Full K,除Tr2与Tr3处理差异不显著外,其他处理之间差异均达到显著水平。在4个钾长石粉处理中,植株含钾量随着微晶化处理时间增加而增大,其中Tr3处理含钾量最高,分别是Tr0、Tr1和Tr2处理的2.49、1.61和1.09倍。

2.3.2 对植株吸钾量的影响 各施钾处理植株吸钾量显著高于CK处理,施钾处理植株吸钾量表现为Tr0 < Tr1 < Tr2 < Tr3 < Full K,施钾长石粉处理的吸钾量仅为Full K处理的23.45%～74.76%,差异达显著水平(表2)。4个钾长石粉处理中,Tr3处理吸钾量最大,分别是Tr0、Tr1和Tr2处理的3.19、1.87和1.18倍,说明微晶化处理时间越长,钾长石粉的生物有效性越高,籽粒苋吸收利用的钾素量就越多。

3 讨论与结论

3.1 微晶化对钾长石粉理化性质的影响

在强机械力的作用下,矿物粉体的物理性质会发生改变。本研究结果表明,在180 min时间内,微晶化处理时间越长,钾长石粉颗粒呈现为粒径下降,均一性提高,表面越粗糙,比表面积增大和晶体结构破坏越严重的趋势。这同Ezequiel等[12]在钠微斜长石和Kleiv等[13]在钾长石和霞石上的研究结果是一致的。

微晶化作用还能促进硅酸盐矿物中矿质元素的溶解和释放,这主要是由于颗粒粒径减小,比表面积增大和晶格结构高度无序化引起的[14]。硅酸盐矿物溶解是一个表面控制的过程[15],发生于晶体缺陷部位[16],该溶解过程中存在两个阶段,抛物线快速释放期和线性平稳释放期[17],第一个阶段矿质元素短时间内从颗粒表面快速释放,主因是微细颗粒比例的增多和整体颗粒粒径下降[18],颗粒表面暴露的晶格缺陷数增多,H^+能轻易地把矿质离子交换出来;第二个阶段缓慢扩散并最终达到溶解平衡,主要是由于暴露的晶格缺陷数随着溶解而减少[19],矿质元素的释放需要进一步破坏硅酸盐矿物的晶体结构来实现。本试验结果也表明,钾长石粉颗粒粒径降低、比表面积增大和晶格畸变促进了钾素的释放,并随着浸提次数的增加,提钾量呈减少的趋势,但由于浸提次数较少,并未发现钾素线性平稳释放期。

本试验条件下,2 mol/L的冷HNO_3 3次最大提钾量仅占钾长石全钾的5.73%(见表1),说明尽管机械力作用使颗粒粒径和比表面积发生了有利改变,但是钾长石晶体的架状结构没有发生实质性的变化(图3),可能是硅氧四面体共角顶形成的三度空间仍牢牢的把钾离子固定住,限制了钾素的释放。

3.2 微晶化对钾长石粉生物有效性影响

已有研究表明,非水溶性含钾矿物经过简单破碎处理后,直接施用可以促进作物生长并达到增产的效果[7-10],这些研究选用的含钾矿物粉主要集中在0.075～0.250 mm的范围内,粒径单一且较大。王敬国等[20]研究表明,片麻岩整体颗粒粒径减小后对作物的产量和钾素吸收量增加更为明显,说明含钾矿物粉的自身理化性质对作物生长有着重要的影响。本试验结果表明,施用钾长石粉促进了籽粒苋的生长,生物量比不施钾处理增加了41.1%～

80.3%,籽粒苋的生物量、植株含钾量和吸钾量均随微晶化处理时间的增加呈增大的趋势,其中粒度最小的 T_3 处理的生物量、植株含钾量和吸钾量分别是粒度最大 T_0 处理的 1.28、2.49 和 3.18 倍。分析认为,产生这种结果的原因主要是微晶化处理后钾长石粉颗粒粒径减小,比表面积增大,晶格缺陷数增多,促进了钾素的释放,同时钾长石粉这种物理性质的改变还增大了颗粒与籽粒苋根系的接触几率和面积,便于籽粒苋根系活化和利用[21]。

本试验是在砂培人为控制条件下实施的,环境相对比较简单,微晶化钾长石粉施入土壤后的转化及对土壤理化性质的影响还需进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 马鸿文, 苏双青, 刘浩, 等. 中国钾资源与钾盐工业可持续发展[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 294-310.
Ma H W, Su S Q, Liu H *et al*. Potassium resource and sustainable development of potash salt industry in China [J]. Earth Sci. Front., 2010, 17(1): 294-310.

[2] 孙爱文, 张卫峰, 杜芬, 等. 中国钾资源及钾肥发展战略[J]. 现代化工, 2009, 29(9): 10-14.
Sun A W, Zhang W F, Du F *et al*. China's development strategy on potash resources and fertilizer[J]. Mod. Chem. Ind., 2009, 29(9): 10-14.

[3] 于滮. 不溶性钾资源制钾肥研究现状[J]. 化工矿物与加工, 2002, (8): 1-3.
Yu G. Research status of preparing potash fertilizer with undissoluble potassium resource[J]. Ind. Miner. Proc., 2002, (8): 1-3.

[4] 韩效钊, 阎勇, 胡波, 等. 钾长石与磷矿磷酸反应机理研究[J]. 磷肥与复肥, 2007, 22(5): 19-22.
Han X Z, Yan Y, Hu B *et al*. Research on the reaction mechanism of potash feldspar and phosphate rock in the phosphoric acid [J]. Phos. & Comp. Fert., 2007, 22(5): 19-22.

[5] 申军. 钾长石综合利用综述[J]. 化工矿物与加工, 2000, (10): 1-3.
Shen J. Summarization of comprehensive utilization of potash feldspar[J]. Ind. Miner. Proc., 2000, (10): 1-3.

[6] 曲均峰, 赵福军, 傅送保. 非水溶性钾研究现状与应用前景[J]. 现代化工, 2010, 30(6): 16-19.
Qu J F, Zhao F J, Fu S B. Current situation and application prospects of water insoluble potash [J]. Mod. Chem. Ind., 2010, 30(6): 16-19.

[7] 王德强, 王亚辅, 张惠芬, 等. 绢云母矿钾肥的研制及其肥效试验[J]. 矿物学报, 2001, 21(3): 409-412.
Wang D Q, Wang Y F, Zhang H F *et al*. Preparation of sericite K fertilizer and its fertility test[J]. Acta Miner. Sin., 2001, 21(3): 409-412.

[8] 晏结义, 吴美仁, 肖雨生. 矿物钾肥在红壤中的试验效果分析[J]. 非金属矿, 2003, 26(4): 27-28.
Yan J Y, Wu M R, Xiao Y S. Effect of mineral potash fertilizer in red soil[J]. Non-Metal. Min., 2003, 26(4): 27-28.

[9] 刘鉴明, 陈坚俊, 卢家诚, 等. 云母类矿物钾肥的施用效应[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(3): 200-203.
Liu J M, Chen J J, Lu J C *et al*. Effect of application micaceous mineral potassium fertilizer[J]. Trop. & Subtrop. Soil. Sci., 1998, 7(3): 200-203.

[10] Sanz Scovino J I, Rowell D L. The use of feldspars as potassium fertilizers in the savannah of Colombia [J]. Fert. Res., 1988, 17: 71-83.

[11] 盖国胜. 微纳米颗粒复合与功能化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. 383-387.
Gai G S. Micro-nanometer particle composition and functional design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. 383-387.

[12] Ezequiel C S, Enrique T M, Cesar D *et al*. Effects of grinding of the feldspar in the sintering using a planetary ball mill [J]. J. Mater. Proc. Technol., 2004, 152: 284-290.

[13] Kleiv R A, Thornhill M. Production of mechanically activated rock flour fertilizer by high intensive ultrafine grinding [J]. Miner. Eng., 2007, 20: 334-341.

[14] Priyono J, Gilkes R J. Dissolution kinetics of milled-silicate rock fertilizer in organic acid[J]. J. Tanah Trop., 2008, 13(1): 1-10.

[15] Lasaga A C. Chemical kinetics of water-rock interaction [J]. J. Geophys. Res., 1984, 89(B6): 4009-4025.

[16] George R, Holdren J R, Speyer P M. Reaction rate-surface area relationships during the early stages of weathering-I. Initial observations[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1985, 49 (3): 675-681.

[17] Erick M J, Grossl P R, Golden D C *et al*. Dissolution kinetics of lunar glass stimulant at 25℃: The effect of pH and organic acids [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1996, 60(1): 157-170.

[18] Holdren R G, Berner R A. Mechanism of feldspar weathering-I. Experimental studies [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1979, 43: 1161-1171.

[19] Oelkers E H, Gislason S R. The mechanism, rates and consequences of basaltic glass dissolution: I. An experiment study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al, Si and oxalic acid concentration at 25℃ and pH = 3 and 11 [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2001, 65: 3671-3681.

[20] Wang J G, Zhang F S, Cao Y P *et al*. Effect of plant types on release of minerals potassium from gneiss [J]. Nutr. Cycl. Agro-Ecol., 2000, 56: 37-44.

[21] 涂书新, 孙锦荷, 郭智芬. 富钾植物籽粒苋根系分泌物及其矿物释钾作用的研究[J]. 核农学报, 1999, 13(5): 305-311.
Tu S X, Sun J H, Guo Z F. The root exudation of gain amaranth and its role in release of mineral potassium [J]. Acta Agric. Nucl. Sin., 1999, 13(5): 305-311.